基于康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系的瘤胃非降解蛋白质小肠可吸收氨基酸流量的简化评定技术

胡志勇　陶　鲲[*]　李延涛　刘晓莲　林雪彦[**]　王中华[**]

(山东农业大学动物科技学院，泰安 271018)

摘　要：本试验旨在简化基于康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系（CNCPS）评定瘤胃非降解蛋白质（RUP）小肠可吸收氨基酸流量的技术。小肠可吸收氨基酸来自菌体蛋白和 RUP，CNCPS 根据溶解性将饲料粗蛋白质（CP）分为 A、B1、B2、B3 和 C 共 5 种组分，只有 3 种 B 组分可以过瘤胃并在小肠中消化。为评定 RUP 小肠可吸收氨基酸的贡献，CNCPS 需要分别测定 3 种 B 组分的瘤胃降解率，3 种过瘤胃 B 组分的小肠消化率需采用不同常数。选择 18 份饲料样品，其中精料 12 份，粗料 6 份，测定 CNCPS 评定 RUP 小肠可吸收氨基酸流量所需数据，同时对饲料 CP 的瘤胃动态降解率及不同时间点 RUP 的体外小肠消化率进行了测定，通过这些数据提出简化评定方法。结果表明：1）精料和粗料均以 8 h 的 CP 瘤胃降解率（X,%）与有效降解率（Y,%）间相关性最强，二者间呈线性相关，精料和粗料方程分别为 Y=12.652+0.828X,r=0.990,P<0.000 1 和 Y=10.967+0.886X,r=0.980,P=0.000 6。2）精料 2 h RUP 小肠消化率（X,%）与 RUP 小肠有效消化率（Y,%）间相关性最强，方程为 Y=0.026+0.879X,r=0.970,P<0.000 1；粗料 8 h RUP 小肠消化率（X,%）与 RUP 小肠有效消化率（Y,%）间相关性最强，方程为 Y=-0.002+0.960X,r=0.995,P<0.000 1。3）简化方案经可靠性评估得出，8 h CP 瘤胃降解率和 RUP 小肠消化率简化 CNCPS 模型预测的小肠氨基酸流量（X,‰）与 CNCPS 预测的小肠氨基酸流量（Y，‰）相关最强，精料方程为 Y=-0.056+1.409X,r=0.999,P<0.000 1;粗料方程为 Y=0.003+2.120X，r=0.999,P<0.000 1。精料和粗料的简化评定结果与 CNCPS 评定结果的均方根误差分别为 0.245 和 0.005，变异系数分别为 7.08%和 4.49%。综合得出，基于 CNCPS，得到了预测 RUP 小肠可吸收氨基酸流量的简化模型，简化后的精料和粗料模型分别为 Y=-0.056+1.409×[AA×（100-D_8）

收稿日期：2016-04-14

基金项目：国家自然科学基金（31572427）；国家自然科学基金(31372340)；国家现代农业（奶业）产业技术体系（CARS-37）；山东省牛产业技术体系（SDAIT-12-011-06）

作者简介：胡志勇(1980-)，男，黑龙江望奎人，讲师，博士，主要从事反刍动物营养研究。E-mail: hzy20040111@126.com

*同等贡献作者

**通信作者：林雪彦，教授，博士生导师，E-mail: linxueyan@sdau.edu.cn；王中华，教授，博士生导师，E-mail: zhwang@sdau.edu.cn

$\times CP\times ID_8$],r=0.999,P<0.000 1 和 Y=0.002+2.120×[$AA\times$（100-D_8）$\times CP\times ID_8$],r=0.999,P<0.000 1，Y 为 RUP 中的某种氨基酸小肠可吸收流量(‰)，D_8 为 CP 的 8 h 瘤胃降解率(%)，ID_8 为 RUP 的 8 h 小肠消化率(%)，AA 为不溶性蛋白质中该氨基酸含量(%)。

关键词：康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系；瘤胃降解率；消化率；氨基酸流量

中图分类号：S823

动物营养主要涉及饲粮营养物质的供给量与动物对营养物质的需要量之间的平衡问题。对于蛋白质和氨基酸营养这部分，各个国家和地区相继提出了新的蛋白质体系，并且建立了小肠可吸收氨基酸流量模型。主要有康奈尔净碳水化合物与蛋白质体系（CNCPS）[1]、Rulquin 等[2]和 NRC(2001)[3]提出的 3 个预测模型。其中，CNCPS 和 Rulquin 等[2]的模型以析因法建立，而 NRC(2001)是以多元回归建立的半析因模型。在这些小肠可吸收氨基酸流量模型当中，美国康奈尔大学提出的 CNCPS 应用较为广泛。

CNCPS 将粗蛋白质(CP)分为非蛋白氮、可溶性真蛋白质、中速降解真蛋白质、慢速降解真蛋白质、不溶性蛋白质共 5 种组分，分别用 A、B1、B2、B3 和 C 表示，通过测定 B1、B2、B3 组分瘤胃非降解蛋白质（RUP）含量、不溶性蛋白质的氨基酸组成以及设定 B 组分的小肠消化率，从而对 RUP 小肠可吸收氨基酸流量的进行预测。但该模型涉及指标较多，有必要对其简化。有研究表明，以饲料常规营养指标拟合各组分的降解速率，得出了较好的预测结果[4]。本研究的目的是以 CNCPS 为基础，通过测定 CNCPS 预测 RUP 小肠可吸收氨基酸流量所需数据，以及各时间点 RUP 的体外小肠消化率，围绕 CP 瘤胃降解率和 RUP 小肠消化率，对 CNCPS 的 RUP 小肠可吸收氨基酸流量预测模型进行简化，提出不同的简化方案，并评估其可靠性。

1　材料与方法

1.1　饲料样品

干酒糟及其可溶物（DDGS）（2 种）、全株玉米青贮（2 种）、黄贮、玉米（2 种）、啤酒糟、玉米蛋白粉、麸皮、豆粕、棉籽粕、次粉、米糠、燕麦、羊草、苜蓿和甜菜粕共 18 份饲料样品。

1.2　试验动物

4 头体重相近、健康且装有瘤胃瘘管的荷斯坦奶牛。每天饲喂 2 次，时间为 08:30 和 15:30；每天挤奶 2 次，时间为 06:30 和 18:30。

1.3　瘤胃降解率的测定

选用 6 cm×12 cm 孔径为 300 目的尼龙袋，每个饲料样品设 2 个重复，每个尼龙袋为 1 个重复，精料样品量约 4 g，粗料样品量约 2 g，随降解时间的延长尼龙袋的数量依次增加。精料的降解时间为 1、2、4、8、16、24、36 和 48 h，共 8 个时间点，粗料的降解时间为 2、4、8、16、24、36、48 和 72 h，共 8 个时间点。尼龙袋内样品 CP 含量采用凯氏定氮法测定[5]。CP 瘤胃降解率的计算利用以下数学模型：

$$P=a+b(1-e^{-ct})$$ [6]。

式中：P 为 t（h）时间点的 CP 瘤胃降解率（%）；a 为快速降解部分（%）；b 为慢速降解部分（%）；c 为 b 的降解速率（%/h）。

CP 有效降解率计算采用以下公式：

$$ED=a+bc/(c+k)$$。

式中：ED 为 CP 有效降解率（%）；k 为瘤胃外流速度（%/h）。

1.4　CNCPS 中 B 组分降解速率的计算

将各个时间点瘤胃 CP 瘤胃降解率（P，%）、各时间点瘤胃各 CP 组分占 CP 的比例（PA、PB1、PB2、PB3，参考张英学等[7]的方法计算）带入以下方程，利用软件 Graphpad Prism 5 进行最小二乘数据拟和计算 B1、B2、B3 组分的瘤胃降解速率（$kd1$、$kd2$、$kd3$，%/h）。

$$P=PA+PB1(1-e^{-kd1t})+PB2(1-e^{-kd2t})+PB3(1-e^{-kd3t})$$ [7]。

之后根据以下公式计算瘤胃未降解 B 组分含量：

$$REPB1=PB1\times[kp/(kd1+kp)];$$

$$REPB2=PB2\times[kp/(kd2+kp)];$$

$$REPB1=PB1\times[kp/(kd3+kp)]。$$

式中：$REPB1$ 为 $B1$ 组分瘤胃未降解含量（%）；$REPB2$ 为 $B2$ 组分瘤胃未降解含量（%）；$REPB3$ 为 $B3$ 组分瘤胃未降解含量（%）；$PB1$、$PB2$、$PB3$ 分别为 B1、B2、B3 占饲料 CP 的比例（%）；kp 为瘤胃外流速度（%/h）。

1.5　CNCPS 对 RUP 小肠可吸收氨基酸流量的预测方程

1.5.1　饲料RUP对小肠氨基酸贡献量的预测方程

$$REFAAi=AAINSPi\times0.01\times(REPB1+REPB2+REPB3+REPC)。$$

式中：*REFAAi* 为饲料原料中氨基酸 *i* 在十二指肠的流量（‰），即瘤胃未降解氨基酸 *i* 含量；*AAINSPi* 为瘤胃降解残渣中氨基酸 *i* 的含量（%），氨基酸含量采用全自动氨基酸仪测定；*REPC* 为瘤胃未降解不溶性蛋白质的含量（%）。

1.5.2　饲料小肠可吸收氨基酸流量的预测方程

$$DIGFAAi=AAINSPi\times0.01\times(IDPB1\times REPB1+IDPB2\times REPB2+IDPB3\times REPB3)。$$

式中：*DIGFAAi*为饲料原料氨基酸*i*在小肠可吸收流量(‰)；*IDPB*1为B1组分的小肠消化率，为100%；*IDPB*2为B2组分的小肠消化率，为100%；*IDPB*3为B3组分的小肠消化率，为80%。

1.6　小肠消化率的测定

以Calsamiglia等[8]推荐的体外法进行测定各时间点RUP小肠消化率。操作步骤：1）准确称取一定量饲料原料或降解残渣（约含15 mg氮），精确到0.000 1g，放入50 mL的离心管中，加入10 mL HCl-胃蛋白酶溶液,振荡混匀，38 ℃条件下在恒温水浴摇床上培养1 h。2）取出离心管，立即加入0.5 mL浓度为1 mol/L的NaOH溶液，旋涡混合器振荡混匀，再加入10 mL的胰酶溶液，振荡混匀。3）38 ℃下水浴摇床上消化24 h。4）消化结束后立即向离心管中加入50%三氯乙酸溶液终止酶反应，使未消化的蛋白质沉淀。5）离心管旋涡混匀，静置15 min，在5 000×*g*下离心10 min，弃去上清液，将残渣无损转移出待测。6）测定残渣中的CP及各CP组分含量。

RUP有效消化率的计算：

各时间点RUP小肠消化率符合以下曲线：

$$ID=s+he^{-kit}。$$

式中：*ID*为某种饲料在瘤胃内降解*t*时间后，该饲料RUP小肠消化率（%）；*ki*为某种饲料各时间点RUP小肠消化率减小的速率（%/h）。

然后，由以下方程计算RUP小肠有效消化率：

$$Di=s[r+bKp/(Kp+Kd)]+hKp[r/(Ki+Kp)+b/(Kd+Kp+Ki)];$$

$$U=r+bKp/(Kp+Kd);$$

$$EID=Di/U^{[5]}。$$

式中：*Di*为*ID*的积分；*r*=1-(*a*+*b*)；*Kp*为饲料的瘤胃外流速度（%/h）；*Kd*为饲料的瘤

胃降解速率（%/h）；*Ki*为某种饲料RUP小肠消化率减小的速率（%/h）；*U*为RUP小肠消化率的极限值；*EID*为小肠有效消化率（%）。

1.7　数据统计

用 Graphpad Prism 5 软件计算瘤胃降解率、B 组分降解速率以及小肠有效消化率；用 SAS 9.2 进行线性回归拟合；用 *t* 检验对简化前后的流量进行差异性分析。

2　结　果

2.1　以瘤胃有效降解率和小肠有效消化率对小肠可吸收氨基酸流量的预测（简化模型 1）

2.1.1　CP 的瘤胃降解率

由表 1 可知，各种饲料的 CP 有效降解率差异较大，其中，豆粕和甜菜粕随降解时间的延长，由于残渣的剩余量极少，降解后期并未给出对应数据。粗料的 CP 有效降解率较高，在 51.39%～75.54%；并且前 2 h 降解较快，这可能与其较高的非蛋白氮含量有关；粗料的各时间点 CP 瘤胃降解率的变化较为平缓。精料的 CP 有效降解率在 34.36%～90.70%；精料的 CP 瘤胃降解率 1～4 h 变化较快的为麸皮，8～24 h 变化最快的为棉籽粕、豆粕和甜菜粕，36 h 之后仍变化很大的为玉米、玉米蛋白粉和啤酒糟。

表 1　饲料 CP 的瘤胃降解率（干物质基础）

Table 1　Ruminal degradability of CP in feed　（DM basis）　%

项目 Items	时间 Time/h									有效降解率 Effective degradability	*r*
	1	2	4	8	16	24	36	48	72		
全株玉米青贮 1 Corn silage 1		67.74	73.61	73.69	73.79	75.96	81.25	82.91	84.54	74.93	0.954
全株玉米青贮 2 Corn silage 2		65.83	66.89	68.25	66.12	73.14	80.49	82.67	84.56	71.92	0.988
苜蓿　Alfalfa		57.64	63.99	71.09	74.45	80.54	87.64	87.95	88.44	75.54	0.989
羊草　Chinese wildrye		37.12	41.56	45.78	37.22	48.71	61.50	65.94	67.43	51.39	0.973
燕麦　Oat		55.09	55.97	59.72	66.98	72.26	71.93	76.78	76.03	66.12	0.990
黄贮　Yellow corn silage		56.99	60.69	61.62	49.30	52.08	66.46	69.81	73.84	62.82	0.982
玉米 1 Corn 1	11.68	17.53	23.56	30.05	35.20	47.80	65.08	81.14		34.36	0.987
玉米 2 Corn 2	14.06	17.68	21.78	29.32	37.11	50.22	69.18	81.13		35.29	0.993
玉米蛋白粉　Corn gluten meal	33.08	35.54	35.76	40.04	49.94	52.94	59.83	73.29		44.58	0.991
米糠　Rice bran	52.52	55.06	61.41	68.58	74.35	78.80	83.15	83.77		68.55	0.996
次粉　Wheat middling	48.14	54.18	63.31	75.91	85.72	92.69	96.45	97.13		75.43	0.998
棉籽粕　Cottonseed meal	21.55	23.97	24.35	46.16	77.40	82.54	86.31	91.38		53.42	0.987
干酒糟及其可溶物 1 DDGS1	87.19	88.22	88.90	90.33	92.08	92.74	94.50	95.74		90.70	0.993
干酒糟及其可溶物 2 DDGS2	25.06	28.00	30.96	35.06	43.70	55.16	61.97	70.92		40.45	0.998
啤酒糟　Beer distiller's grains	18.85	24.51	24.84	33.85	43.14	48.18	65.49	85.88		38.51	0.983

甜菜粕 Beet pulp	13.52	13.97	17.45	22.78	40.66	66.34	82.15			37.54	0.981
豆粕 Soybean meal	21.14	28.44	35.61	47.25	68.61	76.78				53.22	0.998
麸皮 Wheat bran	51.72	61.98	74.89	84.81	88.90	89.95	90.77	92.08		80.07	0.998

2.1.2 RUP 的小肠消化率

由表 2 可知，粗料的 RUP 小肠有效消化率只有苜蓿较高，其他粗料均低于精料。各时间点 RUP 的小肠消化率基本遵循一个规律：随着消化时间的延长，RUP 的小肠消化率变小。

表 2 饲料 RUP 的小肠消化率（干物质基础）

Table 2 Intestinal digestibility of RUP in feed （DM basis） %

项目 Items	时间 Time/h									有效消化率 Effective digestibility
	1	2	4	8	16	24	36	48	72	
全株玉米青贮 1 Corn silage 1		35.14	29.54	24.73	18.45	13.72	14.31	11.79	12.33	23.18
全株玉米青贮 2 Corn silage 2		27.81	25.85	26.50	22.30	22.39	20.50	25.89	22.02	24.90
苜蓿 Alfalfa		60.83	61.14	56.96	51.91	48.76	45.27	45.02	41.92	54.89
羊草 Chinese wildrye		29.31	27.15	21.51	21.57	20.56	17.35	17.51	16.07	22.39
燕麦 Oat		26.81	29.10	28.98	27.18	26.67	6.77	34.84	17.27	25.72
黄贮 Yellow corn silage		35.85	34.16	31.42	28.00	28.48	23.30	21.56	17.14	30.07
玉米 1 Corn 1	73.01	71.06	72.03	62.60	59.01	51.38	43.75	43.93		63.74
玉米 2 Corn 2	65.50	65.86	58.30	60.06	51.68	48.01	50.01	42.56		57.87
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	83.89	83.90	79.94	80.99	76.11	64.02	65.82	59.93		77.15
米糠 Rice bran	48.53	48.25	54.00	46.98	39.94	43.98	38.04	38.97		45.75
次粉 Wheat middling	69.36	71.69	62.40	63.99	52.92	45.62	27.26	23.63		63.79
棉籽粕 Cottonseed meal	71.24	73.04	69.22	65.47	63.05	64.10	59.00	56.86		68.34
干酒糟及其可溶物 1 DDGS1	65.06	62.99	64.01	56.98	53.61	45.61	46.06	40.05		57.72
干酒糟及其可溶物 2 DDGS2	70.34	67.73	66.46	64.96	64.68	60.88	59.59	57.23		65.48
啤酒糟 Beer distiller's grains	67.99	66.02	60.44	56.14	49.70	46.53	47.25	47.74		56.89
甜菜粕 Beet pulp	55.89	54.84	52.99	54.83	45.56	36.63	37.94			50.56
豆粕 Soybean meal	76.49	75.83	72.84	65.36	68.66	67.53				71.37
麸皮 Wheat bran	60.73	59.33	60.85	51.79	45.93	44.53	45.01	38.16		55.75

2.1.3 CNCPS 对 RUP 小肠可吸收氨基酸流量的预测

由表 3 可知，小肠可吸收总氨基酸流量最高的为玉米蛋白粉，最低的为全株玉米青贮 1。

表 3　CNCPS 对饲料 RUP 小肠可吸收氨基酸流量的预测结果（干物质基础）

Table 3　Prediction results of adsorbable amounts of amino acids in small intestine of RUP in feeds based on CNCPS　（DM basis）　‰

项目 Items	全株玉米青贮 1 Corn silage 1	全株玉米青贮 2 Corn silage 2	苜蓿 Alfalfa	羊草 Chinese wildrye	燕麦 Oat	黄贮 Yellow corn silage	玉米 1 Corn 1	玉米 2 Corn 2	玉米蛋白粉 Corn gluten meal	米糠 Rice bran	次粉 Wheat middling	棉籽粕 Cottonseed meal	干酒糟及其可溶物 1 DDGS1	干酒糟及其可溶物 2 DDGS2	啤酒糟 Beer distiller's grains	甜菜粕 Beet pulp	豆粕 Soybean meal	麸皮 Wheat bran
天冬氨酸 Asp	0.038 1	0.075 0	0.618 5	0.115 5	0.083 3	0.116 9	0.448 3	0.235 5	19.450 8	0.445 0	0.288 5	7.098 1	0.167 4	3.889 0	5.640 7	0.426 3	13.673 2	0.234 3
苏氨酸 Thr	0.024 4	0.042 6	0.330 1	0.067 4	0.047 7	0.066 4	0.299 3	0.150 0	10.843 7	0.206 4	0.131 2	2.727 4	0.114 3	2.256 3	2.565 9	0.257 1	4.853 4	0.122 6
丝氨酸 Ser	0.025 2	0.041 1	0.338 8	0.062 8	0.044 5	0.064 0	0.368 1	0.192 9	15.854 2	0.237 7	0.156 5	3.501 8	0.113 8	2.845 7	3.060 5	0.253 0	5.881 5	0.149 9
谷氨酸 Glu	0.084 9	0.116 8	0.813 4	0.198 6	0.138 3	0.181 9	1.910 4	0.874 4	75.925 7	0.786 6	0.711 4	18.166 0	0.412 9	11.480 6	13.909 4	0.593 5	22.664 6	0.660 0
甘氨酸 Gly	0.031 6	0.054 6	0.411 3	0.079 1	0.056 8	0.085 1	0.308 8	0.136 9	7.574 8	0.289 6	0.149 6	3.712 9	0.164 6	2.123 5	2.924 4	0.236 0	5.251 4	0.220 5
丙氨酸 Ala	0.042 3	0.063 3	0.421 6	0.095 8	0.068 5	0.098 6	0.701 4	0.306 5	28.041 5	0.333 5	0.185 2	3.531 7	0.172 4	4.295 0	3.619 9	0.261 9	5.179 8	0.192 8
半胱氨酸 Cys	0.005 2	0.006 1	0.030 4	0.007 3	0.005 5	0.009 6	0.081 8	0.043 1	2.934 2	0.052 2	0.048 1	0.692 1	0.022 9	0.731 7	0.939 8	0.017 0	1.185 2	0.026 7
缬氨酸 Val	0.037 8	0.061 3	0.478 7	0.094 8	0.070 6	0.095 4	0.439 1	0.203 1	14.213 2	0.319 0	0.209 1	4.249 5	0.145 8	2.934 9	4.087 7	0.343 8	5.899 8	0.188 0
蛋氨酸 Met	0.010 2	0.011 0	0.109 0	0.020 7	0.011 1	0.017 2	0.221 8	0.088 8	8.251 6	0.086 8	0.050 4	1.073 4	0.037 4	0.882 1	0.984 7	0.032 0	1.606 7	0.029 1
异亮氨酸 Ile	0.025 1	0.041 1	0.373 1	0.064 3	0.045 8	0.063 9	0.312 2	0.150 5	13.152 3	0.206 3	0.159 9	2.991 6	0.098 8	2.332 2	3.125 3	0.222 6	5.838 6	0.113 0
亮氨酸 Leu	0.061 9	0.083 7	0.679 7	0.126 5	0.087 3	0.130 3	1.325 6	0.590 1	57.602 8	0.445 1	0.310 1	5.784 0	0.252 1	7.957 2	6.062 9	0.363 4	9.980 9	0.245 2
酪氨酸 Tyr	0.015 7	0.022 6	0.245 7	0.027 1	0.014 0	0.035 2	0.296 6	0.143 1	16.615 6	0.170 5	0.138 0	2.274 5	0.071 8	2.331 5	2.698 6	0.223 5	4.191 1	0.081 3
苯丙氨酸 Phe	0.040 5	0.057 1	0.475 7	0.074 1	0.051 2	0.089 0	0.438 3	0.237 7	22.022 0	0.274 7	0.221 4	4.927 8	0.122 2	3.466 2	4.328 9	0.250 6	6.722 0	0.153 8
赖氨酸 Lys	0.026 9	0.051 6	0.536 5	0.076 2	0.052 5	0.080 3	0.189 7	0.102 4	5.437 2	0.282 4	0.159 9	3.985 2	0.122 4	1.945 2	3.125 9	0.422 4	7.635 3	0.170 0
组氨酸 His	0.013 0	0.020 5	0.214 9	0.026 8	0.016 6	0.031 9	0.275 1	0.129 2	6.377 0	0.152 7	0.083 3	2.715 3	0.082 3	1.543 9	1.629 0	0.190 1	3.244 5	0.116 1
精氨酸 Arg	0.022 8	0.042 3	0.370 1	0.075 0	0.054 5	0.065 9	0.358 6	0.162 1	9.622 4	0.429 9	0.241 9	10.012 4	0.109 7	2.443 3	4.729 1	0.229 7	8.593 7	0.290 7
脯氨酸 Pro	0.087 8	0.118 2	0.640 4	0.177 3	0.133 6	0.184 1	1.229 0	0.594 1	45.532 3	0.539 7	0.437 0	10.935 4	0.305 4	7.058 4	8.544 5	0.429 0	13.642 0	0.437 2
色氨酸 Trp	0.002 4	0.000 0	0.090 1	0.008 6	0.000 0	0.000 0	0.065 2	0.039 4	2.371 9	0.069 1	0.005 5	1.056 0	0.000 0	0.785 3	1.460 7	0.095 3	2.188 7	0.025 3
必需氨基酸 EAA	0.265 1	0.411 1	3.658 0	0.634 4	0.437 3	0.640 2	3.924 7	1.853 2	149.894 1	2.472 3	1.572 7	39.522 6	1.084 8	26.546 7	32.100 1	2.407 1	56.563 5	1.453 9

非必需氨基酸 NEEA	0.330 7	0.497 8	3.520 1	0.763 6	0.544 3	0.775 2	5.344 2	2.526 5	211.929 1	2.854 8	2.114 4	49.912 5	1.431 4	34.755 3	41.337 8	2.440 1	71.668 8	2.002 6
总氨基酸 TAA	0.595 8	0.908 9	7.178 1	1.398 0	0.981 7	1.415 5	9.268 9	4.379 7	361.823 3	5.327 1	3.687 1	89.435 2	2.516 2	61.302 0	73.438 0	4.847 1	128.232 3	3.456 5

2.1.4 以瘤胃有效降解率及小肠有效消化率简化 CNCPS 预测小肠可吸收氨基酸流量模型

基于 CNCPS 对 RUP 小肠可吸收氨基酸流量的预测方程，以饲料 CP 瘤胃有效降解率及 RUP 小肠有效消化率替代 B 组分的瘤胃降解率及小肠消化率，得出预测结果，与 CNCPS 评定结果进行线性回归分析。精料和粗料的方程分别为：

$$Y=0.053+1.547X, r=0.973, P<0.000\ 1;$$

$$Y=2.604X, r=0.999, P<0.000\ 1。$$

式中：X 为以饲料 CP 瘤胃有效降解率及 RUP 小肠有效消化率简化 CNCPS 模型得出的预测小肠可吸收氨基酸流量（‰），Y 为 CNCPS 的预测小肠可吸收氨基酸流量（‰）。

精料（P=0.999 9）和粗料简化与未简化的模型得到的预测值（P=0.835 4）之间差异均不显著。

简化后的精料和粗料模型（简化模型 1）分别为：

$$Y=0.053+1.547\times[AA\times(100-ED)\times CP\times EID];$$

$$Y=2.604\times[AA\times(100-ED)\times CP\times EID]。$$

式中：Y 为饲料原料 RUP 中某种氨基酸的小肠可吸收量(‰)，AA 为饲料原料不溶性蛋白质中某种氨基酸的含量(%)，ED 为饲料原料 CP 瘤胃有效降解率(%)，CP 为饲料 CP 含量(%)，EID 为 RUP 小肠有效消化率(%)。

2.2 以单一时间点的瘤胃降解率和小肠消化率对小肠可吸收氨基酸流量的预测（简化模型 2）

2.2.1 CP 的瘤胃实时降解率与有效降解率的相关性

由表 4 可知，对各时间点 CP 的瘤胃实时降解率与有效降解率进行线性回归可发现，精料、粗料均以 CP 的瘤胃 8 h 的降解率与有效降解率相关性最强。

表 4 饲料 CP 各时间点瘤胃降解率（X，%）与瘤胃有效降解率（Y，%）的相关性

Table 4 Correlation between ruminal degradability at different time points （X, %） and effective degradability （Y, %）of CP in feeds

时间 Time/h	精料 Concentrate	r	P 值 P-value	粗料 Roughage	r	P 值 P-value
1	Y=27.653+0.804X	0.928	<0.000 1			
2	Y=23.598+0.822X	0.950	<0.000 1	Y=24.341+0.754X	0.893	0.016 5
4	Y=21.257+0.790X	0.963	<0.000 1	Y=20.662+0.768X	0.919	0.009 5
8	Y=12.652+0.828X	0.990	<0.000 1	Y=10.967+0.886X	0.980	0.000 6
16	Y=1.958+0.853X	0.952	<0.000 1	Y=30.817+0.592X	0.960	0.002 4
24	Y=-13.843+0.981X	0.906	<0.000 1	Y=24.695+0.632X	0.916	0.010 3

36	Y=-42.412+1.246X	0.831	0.001 5	Y=1.301+0.879X	0.950	0.003 6
48	Y=-91.497+1.732X	0.744	0.013 6	Y=-13.255+1.035X	0.953	0.003 2
72				Y=-21.113+1.115X	0.971	0.001 3

2.2.2 RUP 各时间点小肠消化率与有效消化率的相关性

由表 5 可知，对各时间点 RUP 小肠消化率与小肠有效消化率进行线性回归时发现，精料、粗料分别以 2 和 8 h RUP 小肠消化率与有效消化率相关性最强。

表 5 饲料 RUP 各时间点小肠消化率（X，%）与小肠有效消化率（Y，%）的相关性

Table 5 Correlation between intestinal degradability at different time points （X, %） and effective degradability （Y, %） of RUP in feeds

时间 Time/ h	精料 Concentrate	r	P 值 P-value	粗料 Roughage	r	P 值 P-value
1	Y=0.008+0.898X	0.961	<0.000 1			
2	Y=0.026+0.879X	0.970	<0.000 1	Y=-0.032+0.929X	0.956	0.002 8
4	Y=-0.045+1.020X	0.939	<0.000 1	Y=-0.015+0.919X	0.991	0.000 1
8	Y=0.038+0.945X	0.941	<0.000 1	Y=-0.002+0.960X	0.995	<0.000 1
16	Y=0.169+0.794X	0.968	<0.000 1	Y=0.018+1.006X	0.985	0.000 3
24	Y=0.219+0.765X	0.876	0.000 2	Y=0.037+0.989X	0.954	0.003 2
36	Y=0.369+0.496X	0.648	0.031 1	Y=0.118+0.867X	0.914	0.010 7
48	Y=0.426+0.417X	0.555	0.096 1	Y=0.090+0.814X	0.796	0.058 4
72				Y=0.068+1.107X	0.951	0.003 5

2.2.3 以单一时间点的瘤胃降解率和小肠消化率简化 CNCPS 预测小肠可吸收氨基酸流量模型

基于 CNCPS，分别以单一时间点估算的 CP 瘤胃有效降解率和 RUP 小肠有效消化率对 RUP 小肠可吸收氨基酸流量进行预测，将预测结果与 CNCPS 评定结果线性回归。精料方程为：

$$Y=-0.186+1.623X, r=0.997, P<0.000\ 1；$$

式中：X 为以 CP 的 8 h 瘤胃降解率和 RUP 的 2 h 小肠消化率简化 CNCPS 模型预测的小肠可吸收氨基酸流量（‰）,Y 为 CNCPS 模型预测的小肠可吸收氨基酸流量（‰），2 者差异不显著（P=0.999 9）。

粗料方程为：

$$Y=0.002+2.443X, r=0.999, P<0.000\ 1。$$

式中：X 为以 CP 的瘤胃 8 h 降解率和 RUP 的 8 h 小肠消化率简化 CNCPS 模型预测的小肠可吸收氨基酸流量（‰），Y 为 CNCPS 模型预测的小肠可吸收氨基酸流量（‰），2

者差异不显著（P=0.993 1）。

简化后的精料和粗料模型（简化模型 2）分别为：

$$Y=-0.186+1.623\times[AA\times(100-ED_8)\times CP\times EID_2], r=0.997, P<0.000\ 1;$$

$$Y=0.002+2.443\times[AA\times(100-ED_8)\times CP\times EID_8], r=0.999, P<0.000\ 1。$$

式中：Y 为 RUP 中某种氨基酸的小肠可吸收量(‰)；ED_8 为 CP 的 8 h 瘤胃降解率估算的有效降解率(%)；EID_2、EID_8 分别为 RUP 2、8 h 小肠消化率估算的小肠有效消化率(%)；AA 为不溶性蛋白质中该氨基酸的含量(%)；CP 为饲料 CP 的含量(%)。

2.3 以同一时间点的瘤胃降解率和小肠消化率简化 CNCPS 预测小肠可吸收氨基酸流量模型（简化模型 3）

将同一时间点的 CP 瘤胃降解率和 RUP 小肠消化率对 CNCPS 预测模型简化得到结果如表 6 所示。可知精料、粗料均以 8 h 的降解率和小肠消化率对 RUP 小肠可吸收氨基酸流量的预测结果与 CNCPS 评定结果相关性最强。精料和精料方程分别为：

$$Y=-0.056+1.409X,\ r=0.999, P<0.000\ 1;$$

$$Y=0.002+2.120X,\ r=0.999, P<0.000\ 1。$$

式中：X 为以 CP 的 8 h 瘤胃降解率和 RUP 的 8 h 小肠消化率简化 CNCPS 模型预测的小肠可吸收氨基酸流量（‰）,Y 为 CNCPS 模型预测的小肠可吸收氨基酸流量（‰）。

精料（P=0.999 5）和粗料简化与未简化的模型得到的预测值（P=0.997 1）之间差异均不显著。

简化后的精料和粗料模型（简化模型 3）分别为：

$$Y=-0.056+1.409\times[AA\times(100-D_8)\times CP\times ID_8], r=0.999, P<0.000\ 1;$$

$$Y=0.002+2.120\times[AA\times(100-D_8)\times CP\times ID_8], r=0.999, P<0.000\ 1。$$

式中：Y 为 RUP 中的某种氨基酸小肠可吸收流量(‰)，D_8 为 CP 的 8 h 瘤胃降解率(%)，ID_8 为 RUP 的 8 h 小肠消化率(%)，CP 为饲料 CP 含量(%)，AA 为不溶性蛋白质中该氨基酸含量(%)。

表 6 同一时间点的 CP 瘤胃降解率和 RUP 小肠消化率(X,‰)与 CNCPS 预测的小肠可吸收氨基酸流量（Y，‰）的相关性

Table 6 Correlation between adsorbable amounts of amino acids in small intestine predicted by CP ruminal degradability and RUP intestinal digestibility at the same time point (X, ‰) and CNCPS （Y， ‰）

时间 Time/	精料 Concentrate	r	P 值 P-value	粗料 Roughage	r	P 值 P-value

h						
1	Y=-0.394+1.120X	0.982	<0.000 1			
2	Y=-0.429+1.418X	0.990	<0.000 1	Y=0.010+1.337X	0.997	<0.000 1
4	Y=-0.306+1.265X	0.990	<0.000 1	Y=0.009+1.570X	0.998	<0.000 1
8	Y=-0.056+1.409X	0.999	<0.000 1	Y=0.002+2.120X	0.999	<0.000 1
16	Y=0.219+1.827X	0.994	<0.000 1	Y=-0.008+2.617X	0.996	<0.000 1
24	Y=0.265+2.315X	0.993	<0.000 1	Y=-0.015+3.581X	0.983	<0.000 1
36	Y=0.380+2.619X	0.991	<0.000 1	Y=-0.011+5.982X	0.976	<0.000 1
48	Y=0.434+4.300X	0.988	<0.000 1	Y=-0.025++6.348X	0.980	<0.000 1
72				Y=-0.013+7.221X	0.996	<0.000 1

2.4　不同简化模型的比较

由表 7 可知，综合考虑可靠性和简单性，简化模型 3 更加简单可靠。

表 7　不同方法的比较

Table 7　Comparison among different methods

项目 Items	简化模型 1 Simplified model 1		简化模型 2 Simplified model 2		简化模型 3 Simplified model 3	
	精料 Concentrate	粗料 Roughage	精料 Concentrate	粗料 Roughage	精料 Concentrate	粗料 Roughage
线性方程 Linear Equation	Y=0.053+1.547X	Y=2.604X	Y=-0.186+1.623X	Y=0.002+2.443X	Y=-0.056+1.409X	Y=0.002+2.120X
r	0.973	0.999	0.997	0.999	0.999	0.999
测定指标数 Indicator number	18	18	4	3	3	3
均方根误差 RMSPE	1.888	0.000	0.608	0.005	0.245	0.005
变异系数 CV/%	52.19	3.71	17.57	4.75	7.08	4.49

3 讨　论

3.1　CP 瘤胃降解率和 RUP 小肠消化率的分析

3.1.1　CP 瘤胃降解率的分析

本试验的粗料以及 DDGS1 的 CP 瘤胃降解率较高，这可能是由饲料的来源及饲料本身的蛋白质含量决定的。在乔良等[9]的研究中，对蛋白质饲料、籽实和糠麸类饲料以及粗料测定其 CP 瘤胃降解率，其中玉米蛋白粉、棉籽粕和豆粕的 CP 瘤胃降解率与本试验相一致，而玉米和青贮的 CP 瘤胃降解率相差较大，原因可能在于饲料来源、加工工艺以及所用的瘤胃外流速度不一。玉米作为应用广泛的精料，对其 CP 瘤胃降解率的研究很多，NRC(2001)[10]为 63%，在莫放等[11]的研究中，为 26.40%～48.15%，而王艳荣等[12]的结果为 9.86%，可见品种和产地影响较大。

当以 CP 瘤胃降解率与有效降解率进行拟合时，精料、粗料均得到 8 h 的瘤胃降解率与有效降解率相关性最高，和 Yilmaz 等[13]的结果相似，但是有别于王立明[14]的结果（24 和 48 h）。

3.1.2　RUP 小肠消化率的分析

由于 RUP 的差异极大，致使 RUP 的小肠消化率变化范围很广。从本研究得出的各饲料降解残渣的消化率可以看出，随着降解时间的延长，小肠消化率会随之降低，与残渣中不可降解组分的不断富集有关[15]。

粗料的 RUP 小肠有效消化率整体小于精料，但苜蓿的 RUP 小肠有效消化率较高。精料中米糠、啤酒糟、甜菜粕等饲料的小肠有效消化率较低，在 50%以下。

在岳群等[16]的试验中，苜蓿和玉米青贮 RUP 小肠有效消化率为 44.10%和 24.49%，和本试验的 54.89%和 24.90%相近。但是在周荣[17]的研究中，用 16 h 的降解残渣经移动尼龙袋法得到的结果为 88.60%和 61.40%，差异产生可能主要由于试验方法不同。对于精料，赵青余[18]以体外三步法对 16 h 的降解残渣测定小肠消化率，玉米蛋白粉、豆粕、麸皮、啤酒糟、米糠、玉米的 RUP 小肠消化率分别为 85.33%、88.37%、65.39%、70.28%、53.84%和 71.49%。与本试验有一定差异，可能与其所用牛只为西门塔尔和中原黄牛的杂交阉牛有关。而在周荣[17]的研究当中，豆粕和玉米的 RUP 小肠消化率分别为 61.31%、70.35%，和本试验的结果类似。

3.2　简化方法的分析

在以 CNCPS 为基础进行简化时，以瘤胃降解率和小肠消化率对 RUP 小肠可吸收氨基酸流量预测的结果，在未与 CNCPS 拟合之前，其结果较 CNCPS 评定结果偏低。

造成该预测偏差的原因主要有 2 方面：第一，在 RUP 的估计量上，所测饲料的 CNCPS 值要高于实测值；第二，在小肠消化率的设定方面，CNCPS 设定的小肠消化率要高于所测定的小肠消化率。但是当用简化后结果与 CNCPS 结果拟合时，得到了可靠的预测结果，在 CNCPS 基础上简化了预测模型。

4　结　论

基于 CNCPS，得到了预测 RUP 小肠可吸收氨基酸流量的简化模型，简化后的精料和粗料模型分别为：

$$Y=-0.056+1.409\times[AA\times(100-D_8)\times CP\times ID_8], r=0.999, P<0.000\ 1;$$

$$Y=0.002+2.120\times[AA\times(100-D_8)\times CP\times ID_8], r=0.999, P<0.000\ 1$$。

式中：Y 为 RUP 中的某种氨基酸小肠可吸收流量(‰)，D_8 为 CP 的 8 h 瘤胃降解率(%)，ID_8 为 RUP 的 8 h 小肠消化率(%)，AA 为不溶性蛋白质中该氨基酸含量(%)。

参考文献:

[1] O'CONNOR J D,SNIFFEN C J,FOX D G,et al.A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: Ⅳ.Predicting amino acid adequacy[J].Journal of Animal Science,1993,71(5):1298–1311.

[2] RULQUIN H,GUINARD J,VÉRITÉ R,et al.Variation of amino acid content in the small intestine digesta of cattle:development of a prediction model[J].Livestock Production Science,1998,53(1):1–13.

[3] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2001.

[4] 张博.内蒙古白绒山羊十二指肠食糜氨基酸流通量及组成比例预测数学模型的研究[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2004.

[5] 国家技术监督局.GB/T 6432-1994 饲料中粗蛋白测定方法[S].北京:中国标准出版社,1995.

[6] 冯仰廉.反刍动物营养学[M].北京:科学出版社,2004.

[7] 张英学,林雪彦,苏鹏程,等.基于 CNCPS 模型的 14 种饲料瘤胃非降解蛋白组分小肠消化率研究[J].畜牧兽医学报,2010,41(11):1421–1427.

[8] CALSAMIGLIA S,STERN M D.A three-step *in vitro* procedure for estimating intestinal digestion of protein in ruminants[J].Journal of Animal Science,1995,73(5):1459–1465.

[9] 乔良,郝俊玺,闫素梅,等.奶牛主要饲料原料蛋白质瘤胃降解率的研究[J].中国奶牛,2008,(6):18–21.

[10] NRC.Ruminant nitrogen usage[S].Washington，D.C.:National Acadmy Press,2001.

[11] 莫放,冯仰廉.常用饲料蛋白质在瘤胃的降解率[J].中国畜牧杂志,1995,31(3):23–26.

[12] 王艳荣,张海棠,崔艳红,等.不同精料水平对肉牛饲料瘤胃降解的影响[C]//河南省畜牧兽医学会第七届暨 2008 年学术研讨会理事会第二次会议论文集.郑州:河南省畜牧兽医学会,2008:353-356.

[13] YILMAZ A,KOCABA Z,OZTURK E,et al.An investigation on the shortest Ruminal incubation time in calculating effective rumen degradability of nutrients in solvent extracted sunflower seed meal[J].Journal of Animal and Veterinary Advances,2009,8(12):2546–2552.

[14] 王立明.奶牛常用饲料瘤胃降解规律和小肠消化率的研究[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

[15] GONZÁLEZ J,FARÍA-MÁRMOL J,RODRÍGUEZ C A,et al.Effects of stage of harvest on the protein value of fresh lucerne for ruminants[J].Reproduction,Nutrition,Development,2001,41(5):381–392.

[16] 岳群,杨红建,谢春元,等.应用移动尼龙袋法和三步法评定反刍家畜常用饲料的蛋白质小肠消化率[J].中国农业大学学报,2007,12(6):62–66.

[17] 周荣.奶牛常用饲料蛋白质和氨基酸小肠消化率的评价[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2011.

[18] 赵青余.移动尼龙袋法和三步体外法测定反刍动物常用饲料蛋白质小肠消化率的研究[R]//中国农业科学院博士后工作报告.北京：中国农业科学院,2005:44–46.

Simplification of Assessment Technology of Intestinal Absorbed Amino Acids Fluxes of Rumen Undegradable Protein Based on Cornell Net Carbohydrate and Protein System

HU Zhiyong　TAO Kun*　LI Yantao　LIU Xiaolian　LIN Xueyan**　WANG Zhonghua**

(*College of Animal Science and Technology, Shandong Agricultural University, Tai'an* 271018, *China*)

Abstract: This study was conducted to simplify the assessment technology of intestinal absorbed amino acids fluxes of rumen undegradable protein (RUP) based on Cornell net carbohydrate and protein system (CNCPS). Intestinal absorbed amino acids were consisted of microbial protein and RUP. Crude protein （CP） was divided into A, B1, B2, B3 and C in CNCPS based on solubility, only B fractions could pass rumen and be digested in intestine. To estimate the contribution of intestinal absorbed amino acids from RUP, CNCPS model needed the degradability of B fractions,

*Contributed equally

**Corresponding authors: LIN Xueyan, professor, E-mail: linxueyan@sdau.edu.cn；　WANG Zhonghua，professor, E-mail: zhwang@sdau.edu.cn　　(责任编辑　王智航)

and intestinal digestibility of B fractions used different constants. This study collected 18 kinds of feedstuffs including 12 kinds of concentrate and 6 kinds of roughage. The data for measuring RUP intestinal absorbed amino acids fluxes in CNCPS was determined, and it was also determined that ruminal degradability of CP and intestinal digestibility of RUP at different time points. Based on the above data, simplification methods were concluded. The results showed as follows: 1) CP ruminal degradability at 8 h (X, %) and effective degradability (Y, %) got the highest correlation with linear correlation both in concentrates and roughages. The equations for concentrates and roughages were Y=12.652+0.828X, r=0.990, P<0.000 1 and Y=10.967+0.886X, r=0.980, P=0.000 6, respectively. 2) CP intestinal digestibility of residues retained in rumen for 2 h (X, %) got the highest correlation with RUP intestinal effective digestibility (Y, %) for concentrates, and the equation was Y=0.026+0.879X, r=0.970, P<0.000 1; CP intestinal digestibility of residues retained in rumen for 8 h (X, %) got the highest correlation with RUP intestinal effective digestibility (Y, %) for roughages, and the equation was Y=-0.002+0.960X, r=0.995, P<0.000 1. 3) After reliability assessment, the highest correlations were found in intestinal absorbed amino acids predicated by simplified CNCPS models using ruminal degradability and CP intestinal digestibility of residues retained in rumen at 8 h（X, ‰） and CNCPS （Y， ‰）, and the equations for concentrates and roughages were Y=-0.056+1.409X, r=0.999, P<0.000 1 and Y=0.003+2.120X， r=0.999, P<0.000 1, respectively. The root-mean-square phase errors were 0.245 and 0.005, respectively, and the coefficients of variation were 7.08% and 4.49%, respectively. In conclusion, simplified predation models for RUP intestinal absorbed amino acids fluxes are set based on CNCPS, and the simplified modes for concentrates and roughages are Y=-0.056+1.409×[AA×（100-D_8）×CP×ID_8], r=0.999, P<0.000 1 and Y=0.002+2.120×[AA×（100-D_8）×CP×ID_8], r=0.999, P<0.000 1, respectively [Y is RUP intestinal absorbed amino acid flux (‰)，D_8 is CP ruminal degradability at 8 h (%)， ID_8 is RUP intestinal digestibility at 8 h (%)， AA is amino acid content in insoluble protein (%)].

Key words: CNCPS; degradation; digestibility; amino acids fluxes